

## Прецизійний поворотний вузол просторового механізму

В статті розглянуті прецизійні поворотні вузли просторових механізмів. Наведена розроблена конструкція вузла з аеростатичними опорами. Описана методика вимірювань реальної геометрії вузла та схема її регулювання.

**прецизионный поворотный узел, радиальный зазор**

Сучасний стан розвитку технологічного обладнання характеризується появою принципово нових технічних рішень на основі просторових механізмів типу гексапода [1]. Основними вузлами даних механізмів є поворотні опори. Вони допускають обмежений поворот ланок механізму. Поворотний вузол повинен забезпечувати високу точність і надійність роботи. Стабільність взаємного положення деталей в поворотному вузлі регламентується допуском 1 .. 10 мкм. До поворотного вузла висуваються високі вимоги у відношенні плавності роботи та забезпечення необхідних демпфуючих характеристик [2].

Перспективним конструктивним рішенням прецизійного поворотного вузла просторового механізму є сферична опора із рідинним або газовим змащенням. Опори такого типу (гідростатичні або аеростатичні) широко застосовуються в прецизійних вузлах технологічного обладнання [3]. Гідростатичні опори мають високу точність (порядка 0,1 мкм.) допускають значні навантаження (порядку 10 кН) і характеризуються високими демпфуючими властивостями. Недоліком гідростатичних опор є наявність зовнішніх витоків рідини та відповідно необхідність спеціальних пристроїв ущільнення або дренажу. Аеростатичні опори не мають таких недоліків, але характеризуються низькими демпфуючими властивостями [4].

Розробка прецизійних поворотних вузлів просторових механізмів на основі гідростатичних або аеростатичних опор є важливою науковою проблемою, яка має велике практичне значення для створення технологічного обладнання нового покоління.

Прецизійні опорні вузли із рідинним або газовим змащенням досліджувались різними авторами [3–4]. Гідростатично-гідродинамічний опорний вузол розглянуто в роботі [5]. Він має високу точність, але виконаний у вигляді циліндричного підшипника і не може бути застосований в якості опорного вузла просторового механізму. Ряд конструкцій опорних вузлів ковзання просторових механізмів розглянуті в роботі [6]. На основі даних досліджень розроблено конструкції прецизійних поворотних вузлів просторових механізмів типу гексапода. Недоліками вказаних досліджень є відсутність практичних рекомендацій по конструюванню вузлів та методик вибору та уточнення основних параметрів прецизійних поворотних вузлів просторових механізмів.

Дана стаття присвячена розробці дослідного зразка прецизійного поворотного вузла просторового механізму та методів забезпечення необхідних параметрів точності вузла.

Просторовий механізм має штанги 1 змінної довжини із приводами (рис. 1). На кінцях штанги встановлені прецизійні поворотні вузли 2, 3, які допускають вільне поперечно кутове переміщення штанг у двох напрямках  $\eta$ ,  $\theta$ .

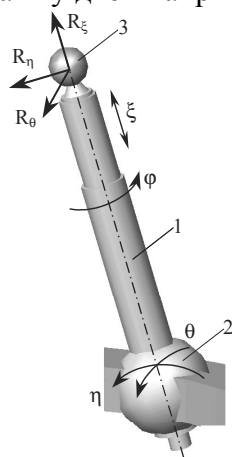


Рисунок 1 –Просторовий механізм із прецизійними поворотними вузлами та переміщення і навантаження, які діють в прецизійних опорних вузлах

Поворотний вузол повинен забезпечувати поворот і фіксацію штанги відносно осі на кут  $\varphi$ . В поворотному вузлі виникають значні статичні і динамічні навантаження. В основному вони характеризуються головним вектором реакції опори із складовими  $R_\theta$ ,  $R_\eta$ ,  $R_\xi$ . Моментне навантаження в опорі визначається силами тертя і є незначним.

Розроблений прецизійний поворотний вузол просторового механізму має нерухому сферу 1 встановлену на осі 2, яка розміщена на платформі просторового механізму (рис. 2).

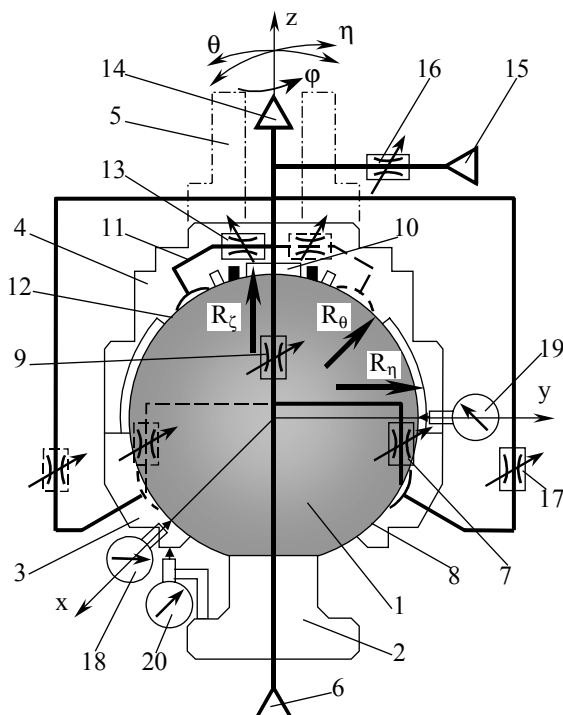


Рисунок 2 –Прецизійний поворотний вузол просторового механізму

Нерухому сферу охоплює корпус 3 поворотного вузла і зв'язана з корпусом кришка 4 на якій закріплена штанга 5 просторового механізму.

В нерухомій сфері змонтована пневмосистема, яка включає підвід повітря 6, регульовані дроселі 7 для подачі повітря в три аеростатичні опори 8 корпусу 3 та кран 9. В кришці 4 виконано колектор 10, який служить для підводу повітря із нерухомої сфери 1 в рухому кришку 4. В кришці також розташовані три канали 11 для подачі повітря в три аеростатичні опори 12 кришки. В кожному із каналів встановлено регульовані дроселі 13. В кришці опорного вузла також наявний канал 14 для відводу повітря від поворотного вузла та додатковий підвід 15, який підключено до пневмомережі опорного вузла через кран 16 та три дроселі 17, які служать для можливого додаткового підводу повітря до аеростатичних опор 8 корпусу.

Повітря із магістралі 6 подається в три аеростатичні опори 8 корпусу 3 та через колектор 10 в аеростатичні опори 12 кришки 4. При цьому між нерухомою сферою 1 і корпусом 3 жорстко з'єднаними з кришкою 4 утворюється газовий шар, який забезпечує безконтактну взаємодію рухомих деталей поворотного вузла (корпусу і кришки) та нерухомої сфери.

Для контролю радіального зазору між сферичними поверхнями в опорному вузлі встановлені індикатори 18 - 20, що дозволяють здійснити виміри взаємного зміщення рухомих частин вузла відносно нерухомої сфери при регулюванні параметрів вузла.

Індикатори вимірюють зміну взаємного положення нерухомої сфери і рухомих деталей вузла в трьох взаємно-перпендикулярних напрямках  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Опорний вузол може працювати в двох режимах. В першому режимі фіксується поворот корпусу відносно осі ( $\varphi = \text{const}$ ). Для цього служить спеціальний фіксатор, не показаний на малюнку. При цьому дроселі 17 закриваються і підвід повітря до аеростатичних опор 8 здійснюється через дроселі 7.

В другому режимі роботи опорного вузла має місце вільний поворот корпусу відносно нерухомої сфери на кут  $\varphi$ . При цьому дроселі 7 перекриваються, а повітря до аеростатичних опор 8 підводиться через дроселі 17.

Точність поворотного вузла визначається в основному похибками сферичних поверхонь деталей поворотного вузла. Для підвищення точності забезпечення радіального зазору між сферичними поверхнями в конструкції опорного вузла передбачено регулювання зазору. Кришка має мікрометричні регульовальні гвинти, які дозволяють переміщувати її відносно корпусу. Можливе мікропереміщення центра сфери корпусу в трьох взаємно перпендикулярних напрямках  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $z_1$  (рис. 3).

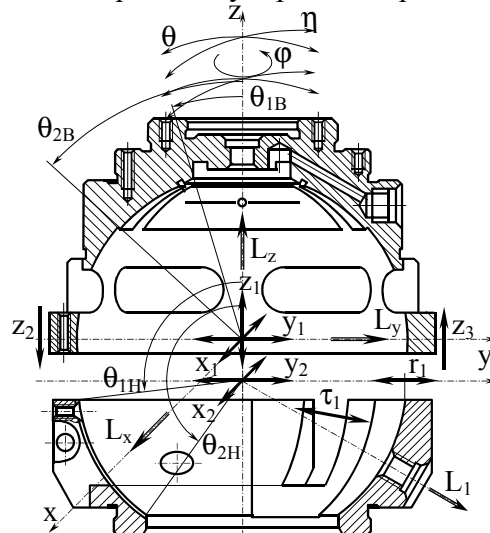


Рисунок 3 - Схема відносних мікропереміщень корпусу і кришки опорного вузла при регулюванні зазору між сферичними поверхнями та зміні діаметрального зазору внутрішньої сферичної поверхні корпусу

Гвинти розміщені на периферії кришки і дозволяють змінювати її поперечно кутове положення в напрямках  $\eta$ ,  $\Theta$ . Це забезпечується різницею установки країв кришки в напрямках  $z_2$  і  $z_3$ .

Корпус опорного вузла відповідно може зміщуватись відносно кришки в напрямках  $x_2$ ,  $y_2$ ,  $z_1$ . Додатково в конструкції корпусу передбачено регулювання діаметрального зазору сфери в напрямку  $r_1$ . Регулювання здійснюється зміною ширини трьох пазів у тангенціальних напрямках  $\tau_1$  за допомогою спеціальних гвинтів.

Сферичні опори, які застосовується в конструкціях просторових механізмах мають похибки геометрії. Тому фактичні робочі поверхні опори мають складну форму. Для визначення фактичної величини поточного радіального зазору між сферичними поверхнями розроблена спеціальна схема вимірів та аналізу одержаних результатів.

Поточний радіальний зазор між поверхнями нерухокої сфери і сферичними внутрішніми поверхнями корпусу і кришки являє собою функцію двох змінних. В якості таких змінних вибрані кутові координати  $\theta$ ,  $\phi$ , які характеризують положення точки в якій визначається зазор. Схема виміру радіального зазору в опорі ілюструється рис. 4 на якому зображено переріз опорного вузла для  $z = \text{const}$  ( $\theta = \text{const}$ ).

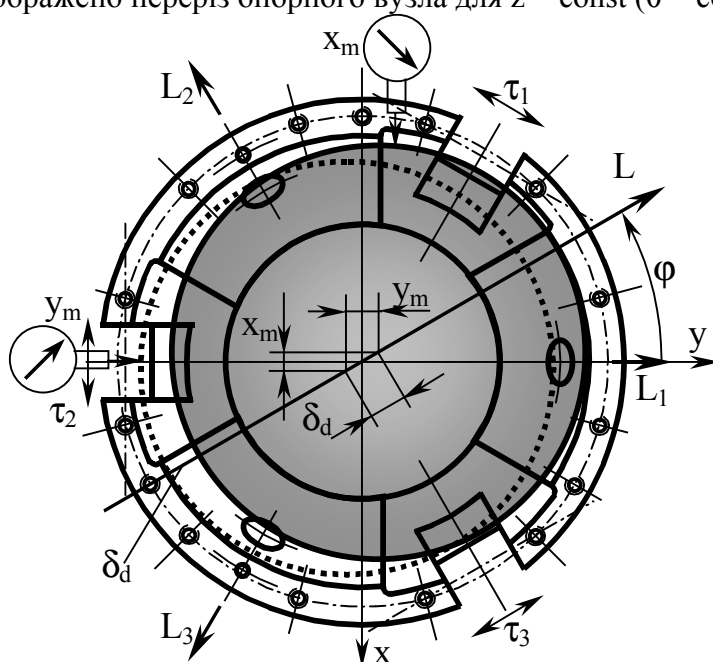


Рисунок 4 –Схема виміру діаметрального зазору між сферичними поверхнями вузла в площині  $z = \text{const}$

Зміщення корпусу опори відносно нерухокої сфери в даному перерізі відбувається в двох напрямках  $x$  і  $y$ . Результируючий напрямок  $L$  в якому вимірюється зазор визначається кутом  $\phi = \arctg \frac{x_m}{y_m}$ , де  $x_m$ ,  $y_m$  – переміщення корпусу відносно нерухокої сфери виміряні індикаторами.

Величина діаметрального зазору знаходиться по результатам вимірів за формулою:

$$\delta_d = \sqrt{(x_m)^2 + (y_m)^2} . \quad (1)$$

Таким чином за результатами вимірів поздовжнього  $y_m$  та поперечного  $x_m$  переміщення сфери відносно корпусу знаходиться величина діаметрального зазору в напрямку  $L$ , який характеризується кутом  $\phi$ .

В загальному випадку сфера і корпус опорного вузла мають відносно зміщення в просторі, яке характеризується проекціями  $x_m, y_m, z_m$ .

Кутове положення променя  $L$ , який визначає напрямок виміру визначається співвідношеннями

$$\varphi = \arctg \frac{x_m}{y_m}, \quad \theta = \arctg \frac{\sqrt{x_m^2 + y_m^2}}{z_m}. \quad (2)$$

Величина діаметрального зазору зв'язана із проекціями переміщень

$$\delta_d = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}. \quad (3)$$

Корпус і кришка зміщуються відносно нерухомої сфери у всіх напрямках. В силу конструктивних особливостей опорного вузла існує кілька характерних напрямків взаємного переміщення корпусу і нерухомої сфери. Це, зокрема, переміщення в напрямках осей  $x, y, z$ . Вони характеризуються променями  $L$  із кутовими координатами:  $\varphi = \frac{3}{2}\pi, \theta = \frac{\pi}{2}$  для напрямку  $L_x$ , який співпадає з віссю  $x$ ;  $\varphi = 0, \theta = \frac{\pi}{2}$  для напрямку  $L_y$ , який співпадає із віссю  $y$ ;  $\varphi = 0 \dots 2\pi, \theta = 0$  для напрямку  $L_z$ , який співпадає з віссю  $z$ .

Діаметральні зазори, які відповідають даним напрямкам визначаються за умовами:

$$\begin{aligned} \delta_{dx} &= (x_m)_{\max} \text{ при всіх можливих } y_m \text{ і } z_m; \\ \delta_{dy} &= (y_m)_{\max} \text{ при всіх можливих } x_m \text{ і } z_m; \\ \delta_{dz} &= (z_m)_{\max} \text{ при всіх можливих } y_m \text{ і } x_m. \end{aligned} \quad (4)$$

Одержані значення діаметральних зазорів у трьох взаємно-перпендикулярних напрямках служать для визначення центрального положення опорного вузла і відповідного введеному центру поточного радіального зазору.

В якості центра для визначення радіального зазору вибрано точку, в якій

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_{dx}}{2}, \quad \delta_{ry} = \frac{\delta_{dy}}{2}, \quad \delta_{rz} = \frac{\delta_{dz}}{2}. \quad (5)$$

Крім головних напрямків існує нескінченна кількість інших напрямків. Характерними напрямками  $L_1, L_2, L_3$  є вісі розташування аеростатичних опор корпусу та напрямки, які відповідають межах аеростатичних опор.

Для підвищення точності і достовірності визначення радіального зазору розроблено і апробовано спеціальну методику вибору представницьких напрямків вимірів радіального зазору. Напрямки в межах областей аеростатичних опор формуються випадковим чином за допомогою генератора випадкових чисел. При цьому значно скорочується об'єм необхідних вимірів радіального зазору і суттєво підвищується точність визначення радіального зазору. Одержаний випадковий масив напрямків  $L^*$  характеризується набором випадкових координат  $\theta^*$  і  $\varphi^*$ . Вони являють собою випадкові числа розподілені по рівномірному закону.

Область розташування кутових координат напрямків вимірів є багатозв'язною. Точки вимірів групуються в межах кільцевого шару к сферичної поверхні кришки та в межах сферичних областей  $a, b, c$  опор корпусу (рис. 5).

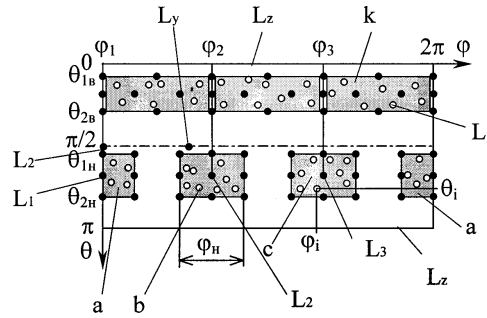


Рисунок 6 – Область розташування кутових координат характерних напрямків вимірів радіального зазору в опорному вузлі

Таким чином для визначення фактичних радіальних зазорів вибирається масиву напрямків вимірів ( $L_i$ ) з координатами ( $\theta_i, \varphi_i$ ). Дані напрямки вимірів забезпечуються виконанням наступних співвідношень між проекціями переміщень корпусу опори відносно нерухомої сфери

$$\frac{x_{ri}}{y_{ri}} = \operatorname{tg} \varphi_i, \quad \frac{\sqrt{x_{ri}^2 + y_{ri}^2}}{z_{ri}} = \operatorname{tg} \theta_i. \quad (6)$$

Вказані співвідношення досягаються шляхом послідовного підбору положень корпусу при його переміщенні регульовальними гвинтами. Величина радіального зазору для  $i$ -го напрямку визначається залежністю

$$\delta_{ri} = \sqrt{x_{ri}^2 + y_{ri}^2 + z_{ri}^2}. \quad (7)$$

Одержаний масив радіальних зазорів дає в дискретному вигляді ряд характерних значень радіальних зазорів в опорному вузлі. В своїй сукупності значення радіальних зазорів являє собою дискретну функцію двох змінних:

$$\delta_{ri} = f(\theta_i, \varphi_i). \quad (8)$$

В процесі досліджень розроблена математична модель, яка описує радіальний зазор по всій поверхні сфери. Точкові значення радіальних зазорів як дискретної функції двох змінних згладжені (інтепольовані) за допомогою двовірних кубічних сплайнів. Особливістю інтерполяції значень радіального зазору є його періодичність по кутовим координатам  $\theta$  і  $\varphi$ . Тому область визначення дискретної моделі продовжена з метою одержання багатолісної функції визначеної на сфері. Одержана експериментально дискретна модель радіального зазору додатково повторюється 8 раз в областях сусідніх з областю визначення на сфері. В результаті одержана сплайн функція двох змінних  $\Phi_s(\theta, \varphi)$ . Вона є строго періодичною в межах вихідної області з координатами  $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$

Опис радіального зазору за допомогою кубічних сплайнів послужив основою для розробки математичної моделі експериментально визначеного радіального зазору. Модель являє собою аналітичну залежність у вигляді функціонального ряду складеного із сферичних гармонік виду

$$Z(m, n, \varphi, \theta) = (\alpha \cos m\varphi + \beta \sin m\varphi) \cdot P_n^m(\cos \theta), \quad (9)$$

де  $\alpha, \beta$  – константи, які визначають амплітуду сферичної гармоніки;

$m, n$  – параметри, які визначають порядковий номер гармоніки;

$\varphi, \theta$  – кути, які визначають точку на сфері де визначається радіальний зазор  $\Phi_e(\theta, \varphi)$ ;

$P_n^m(\cos \theta)$  – приєднана функція Лежандра.

Ряди складені із сферичних гармонік застосовані для опису геометрії сферичних поверхонь, які утворюють аеростатичні опори. Радіальний зазор  $\Phi_e(\theta, \varphi)$  визначено у

вигляді функціонального ряду аргументами якого є кутові координати  $\varphi$  і  $\theta$  системи координат жорстко зв'язаної із нерухомою сферою. Ряд має вигляд:

$$\Phi e(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} \alpha_{no} L_n(\cos \theta) + \sum_{m=1}^j P_n^m(\cos \theta) (\alpha_{nm} \cos m\varphi + \beta_{nm} \sin m\varphi), \quad (10)$$

де  $L_n(\cos \theta)$  – поліном Лежандра порядку  $n$ .

Коефіцієнти ряду  $\alpha_{no}$ ,  $\alpha_{nm}$ ,  $\beta_{nm}$  являють собою двомірні масиви. Значення коефіцієнтів зв'язані із функціональною залежністю  $\Phi s(\theta, \varphi)$  інтегральними співвідношеннями наступного виду:

$$\begin{aligned} \alpha_{nm} &= \frac{2n+1}{2\pi} \cdot \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int_0^{2\pi} d\varphi \cos m\varphi \int_0^{\pi} \Phi s(\theta, \varphi) P_n^m(\cos \theta) \sin \theta d\theta; \\ \beta_{nm} &= \frac{2n+1}{2\pi} \cdot \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int_0^{2\pi} d\varphi \sin m\varphi \int_0^{\pi} \Phi s(\theta, \varphi) P_n^m(\cos \theta) \sin \theta d\theta; \end{aligned} \quad (11)$$

$$n = 0, 1, \dots \quad m = 0, 1, \dots, j.$$

Дані залежності використано для безпосереднього інтегрування сплайн функції, що описує фактичний радіальний зазор в опорному вузлі.

Математична модель радіального зазору в опорному вузлі є основою теоретичних досліджень робочих процесів, які протікають в аеростатичних опорах.

Точність опорного вузла визначається відхиленнями радіального зазору від номінального (середнього) значення. Регулюючи форму і розміри радіального зазору в різних напрямках можна суттєвим чином підвищити точність опорного вузла і знизити витрати повітря в аеростатичних опорах. Розроблені методи виміру радіального зазору в поєднанні з його регулюванням дозволяють вибрати розміри радіального зазору близькі до оптимальних. В якості критерію оптимізації радіального зазору вибрано мінімум середньоквадратичного відхилення квадрата величини зазору від свого середнього значення.

Практична реалізація регулювання опори при виборі оптимального радіального зазору включає кілька етапів. Спочатку встановлюються приблизно однакові діаметральні зазори в напрямках осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Одержані значення діаметральних зазорів  $x_m \approx y_m \approx z_m \approx \delta_d$  служать для вибору і індикації центрального положення опори. Центральне положення відповідає однаковим зазорам в напрямках осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , величина яких складає

$$\delta_{rx} = \frac{x_m}{2}, \quad \delta_{ry} = \frac{y_m}{2}, \quad \delta_{rz} = \frac{z_m}{2}, \quad (12)$$

$$\delta_{rx} \approx \delta_{ry} \approx \delta_{rz} \approx \frac{\delta_d}{2}. \quad (13)$$

Номінальне значення квадрата радіального зазору вибирається у вигляді

$$S_0 = \delta_{rx}^2 + \delta_{ry}^2 + \delta_{rz}^2 / 3. \quad (14)$$

На другому етапі оптимізації знаходиться масив значень радіальних зазорів  $\delta_{ri}$  для сукупності розглянутих раніше випадкових напрямків вимірів.

Одержаний масив значень радіального зазору знаходиться шляхом вимірів проекцій переміщення опори  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  відповідних  $i$ -му напрямку вимірів переміщення.

Квадрат радіального зазору в  $i$ -му напрямку

$$S_i = \delta_{ri}^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, \quad (15)$$

обчислений у всіх  $i=1, 2, \dots, n$  напрямках являє собою масив інформації для знаходження міри відхилення зазору від середнього значення.

В якості міри відхилення згідно метода найменших квадратів прийнята величина

$$D = \sum_{i=1}^n (S_i - S_0)^2. \quad (16)$$

В процесі регулювання зазору спочатку здійснюється знаходження міри відхилення  $D_1$  для певного початкового положення регулювання опорного вузла.

Потім виконується аналіз квадратів відхилень радіального зазору від квадрата середнього значення. При цьому визначаються напрямки, при яких відхилення  $L_{\max}^k$ ,  $k=1,2,3$  є максимальними

$$(S_i - S_0)_{\max} \text{ при } i=1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

Одержані напрямки  $L_{\max}^k$  є напрямками регулювання положення кришки опори відносно корпусу з метою зменшення максимального і середнього відхилення квадрата радіального зазору від його номінального значення.

Після виконання регулювання знову проводяться виміри масиву значень радіального зазору і знаходиться нове значення міри відхилення  $D_2$ .

Цей процес повторюється декілька раз, забезпечуючи наближену умову  $\min(D)$  та  $\min[(S_i - S_0)_{\max}]$ .

Одержане положення кришки опори відносно корпусу вважається оптимальним з точки зору забезпечення необхідного радіального зазору.

Розроблена схема регулювання дала можливість встановити середній радіальний зазор в опорному вузлі в межах 14..18 мкм.

З вищенаведеного можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена конструкція прецизійного поворотного вузла просторового механізму із аеростатичними опорами, які забезпечують високу точність положення опори при мінімальних силах тертя.

2. Запропонована методика вимірів поточного радіального зазору дозволяє одержати повну інформацію про реальний радіальний зазор в опорі та описати його функціональними рядами, складеними із сферичних гармонік, що включають приєднані функції Лежандра.

3. Конструкція опорного вузла дає можливість регулювати радіальний зазор по спеціальній методиці, вибираючи його оптимальним чином.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується визначення параметрів жорсткості та вібростійкості опорного вузла.

## Список літератури

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.В., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою. Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Тенденції розвитку верстатів паралельної структури// Вісник Сумського державного університету. – 2003 - №2(48). – с.18-22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973, – 847 с.
3. Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков. Т.2. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.
4. Шиманович М.А. Безконтактные опоры с внешним источником давления смазочной среды. – Станки и инструменты № 6, 1987, С. 16 – 18.
5. Дем'яненко С.К. Розробка методології конструювання гідростатично-гідродинамічних опор металорізальних верстатів з підвищеними показниками жорсткості. Дис. Канд. техн. наук. – Київ, НТУУ “КПІ”, 2002. – 120 с.
6. Самі (Мох'д Амін) Мох'д Іхміш. Підвищення статичної та динамічної точності просторових механізмів паралельної кінематики із сферичними опорами. Дис. Канд. техн. наук. – Київ, НТУУ “КПІ”, 2005. – 224 с.

В статье рассмотрено прецизионные поворотные узлы пространственных механизмов. Приведена разработанная конструкция узла с аэростатическими опорами. Описана методика измерений реальной геометрии узла и схему ее регулирования.

The pretzsyzyonnye turning knots of spatial mechanisms are considered in the article. The developed construction of knot is resulted from by aerostatics supports. The method of measurings of the real geometry of knot is described and chart its reguluvannyu.